

二维 Otsu 自适应阈值快速算法的改进

钱卫星^{1,2}, 黄丽亚²

(1. 杭州职业技术学院 信息工程学院, 浙江 杭州 310018;
2. 南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 分析二维 Otsu 自适应阈值快速算法的斜方窄带判决域特性,在不增加算法复杂度的前提下,通过建立窄带斜方轴截距与图像像素二维概率密度信息关联分布数据,提出动态窄带斜方轴截距自适应选择方法.实验结果表明:改进后的二维 Otsu 自适应阈值快速算法更加适应图像分割的实际工况,并取得良好的图像分割效果.

关键词: 图像分割; 二维 Otsu; 窄带斜方; 自适应轴截距

中图分类号: TP 391.41 **文献标志码:** A

阈值分割^[1]是图像分割处理的典型算法,其算法简单而有效,被广泛地应用于计算机视觉图像处理领域.近年来,如何优化分割阈值算法、提升图像分割效果成为图像处理领域研究的热点问题之一.许多学者提出了多种分割阈值的选取方法.其中,依据方差判别确定图像分割阈值的 Otsu 法因算法相对简单、分割效果满足一般要求而得到了广泛地应用.Otsu 算法由日本学者大津于 1979 年提出,也称大津阈值法^[2].由于一维 Otsu 直方图信息量的局限,学者提出了二维 Otsu 自适应阈值分割方法,使分割效果得到了改善^[3-4].然而,引入二维 Otsu 直方图后,算法复杂度大幅度增加,不能实时处理.郝颖明等^[5-7]改进了算法,改判决域直分为斜分,提出不同阈值分割准则,增强图像的分割效果,降低算法的运算量,提高算法的处理速度.张新明等^[8-10]运用二维直方图概率分布特性,结合最小误差方式,在斜分算法基础上,改进快速二维直方图斜分算法的阈值分割方法.本文在二维 Otsu 自适应阈值快速算法基础上^[11-13],提出动态窄带斜方轴截距 N 和 M 的自适应选择方法,并根据图像像素的概率密度信息,进一步进行优化调整.

1 Otsu 算法

基于图像灰度的一维直方图,以图像主体目标前景和图像背景类间最大方差为图像分割阈值选取准则,完成图像目标部分与背景部分的分离.类间方差越大,说明构成图像的主体目标与背景两部分的差别越大.图像分割效果越好,意味分割时图像内容错分的概率和比例越小.

图像像素集合为 $f(x,y)$,图像总平均灰度为 μ ,类间方差为 S_b ,其主体目标和背景的分割阈值符为 T ,属于主体目标像素的平均灰度为 μ_0 ,其像素占图像总像素的比例为 ω_0 ,图像背景像素平均灰度为 μ_1 ,其像素占图像总像素的比例为 ω_1 .假设图像大小为 $M \times N$,图像中像素灰度值小于阈值点 T 的像素数量为 N_0 ,大于阈值点 T 的像素数量为 N_1 ,则关系表达式为

$$\omega_0 = N_0 / (M \times N), \tag{1}$$

$$\omega_1 = N_1 / (M \times N), \tag{2}$$

收稿日期: 2015-06-15

通信作者: 钱卫星(1974-),男,讲师,博士研究生,主要从事嵌入式技术应用的研究. E-mail:qianweixingxdx@163.com.

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(Y201327284)

$$N_0 + N_1 = M \times N, \tag{3}$$

$$\omega_0 + \omega_1 = 1, \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\mu} = \omega_0 \times \boldsymbol{\mu}_0 + \omega_1 \times \boldsymbol{\mu}_1, \tag{5}$$

$$S_b = \omega_0 (\boldsymbol{\mu}_0 - \boldsymbol{\mu})^2 + \omega_1 (\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu})^2. \tag{6}$$

在很多情况下,基本算法进行图像分割都能取得良好效果,但图像灰度一维直方图仅能表达图像灰度分布信息,缺失图像内像素间各种空间关联的有效信息.因此,在图像背景较复杂性的情况下,如信噪比较弱、光照过暗等不利因素较多时,图像一维灰度直方图便不能理想地区分图像主体目标和图像背景信息,此时再依据基本算法进行图像分割就会造成误分割概率大幅上升.

2 二维 Otsu 原理及斜分快速算法

2.1 二维 Otsu 原理

关联原始图像像素点信息与其邻域像素点信息,建立图像像素信息联合直方图.将一维 Otsu 算法推广到二维 Otsu 算法,并建立阈值的自适应判别算法.挖掘图像像素关联信息并加以利用后,有效克服了分割时的图像背景噪声影响,极大提高了图像分割准确性,使图像分割效果得到有效改善.

设一图像 $f(x,y)$ 的灰度等级为 $(0,1,2,\cdots,L-1)$,共 L 级,其邻域平滑图像 $g(x,y)$ (以 $k \times k$ 的邻域图像像素均值作为该灰度值)的灰度级也为 L 级,表达式为

$$g(x,y) = \frac{1}{k^2} \sum_{m=-k/2}^{k/2} \sum_{n=-k/2}^{k/2} f(x+m,y+n). \tag{7}$$

式(7)中: $1 \leq x+m \leq M, 1 \leq y+n \leq N$, M 和 N 分别为图像的宽度和高度; k 一般取奇数.

建立像素灰度值 i 和邻域平均灰度值 j 的图像像素二维灰度信息数据,记满足 i 和 j 像素点数为 $f_{i,j}$,图像总像素数为 K ,则有二维联合概率密度为 $P_{i,j} = f_{i,j}/K$,相关等式为

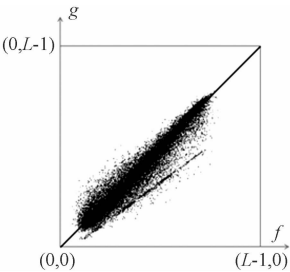
$$\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} f_{i,j} = K, \quad \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{i,j} = 1. \tag{8}$$

原始图与二维 Otsu 直方图,如图 1 所示.由图 1(b)可知:图像主体目标像素和图像背景像素围绕在二维直方图的 45° 对角线周边;图像主体目标像素、图像背景像素的各自灰度值和其邻域灰度均值较接近,而在图像主体目标和图像背景的分界邻域处,像素的灰度值和邻域的灰度均值差距较大.

设任给定一个阈值数据 (s,t) ,将二维 Otsu 直方图分割成 A~D 等 4 个区域,如图 2 所示.由图 2 可知:区域 B 对应于图像主体目标像素;区域 C 对应于图像背景像素;区域 A,D 的大部分远离对角线,图像像素灰度与邻域均值灰度差别较大,对应图像边缘和图像噪声等.



(a) 原始图像



(b) 二维 Otsu 直方图

图 1 原始图像与 Otsu 直方图

Fig. 1 Original image and Otsu image histogram

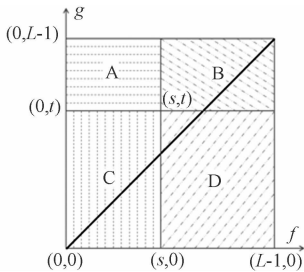


图 2 二维 Otsu 阈值直分法图
Fig. 2 2D Otsu histogram vertical segmentation method

由 $i,j,f_{i,j},P_{i,j}$ 可以计算出图像主体目标像素点数比例 ω_0 ,主体目标像素均值灰度 $\boldsymbol{\mu}_0$,图像背景像素点数比例 ω_1 ,背景像素均值灰度为 $\boldsymbol{\mu}_1$,以及图像像素总均值灰度 $\boldsymbol{\mu}_x$,前景、后景概率比例为

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=t}^{L-1} P_{i,j}, \quad \omega_1 = \sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=0}^{t-1} P_{i,j}. \tag{9}$$

各平均灰度计算公式为

$$\boldsymbol{\mu}_0 = (\mu_{0,i}, \mu_{0,j})^T = \left(\sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} i P_{i,j}, \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} j P_{i,j} \right)^T, \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\mu}_1 = (\mu_{1,i}, \mu_{1,j})^T = \left(\sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} i P_{i,j}, \sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} j P_{i,j} \right)^T, \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\mu}_z = (\mu_{z,i}, \mu_{z,j})^T = \left(\sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} i P_{i,j}, \sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} j P_{i,j} \right)^T. \quad (12)$$

大多数图像的图像边缘概率比例和图像噪声概率比例很小,在图像分割效果满足实际要求的情况下,这部分数据可以忽略不计.因此,设定区域 A 和 D 的概率比例为零.式(9),(12)可近似为

$$\omega_0 + \omega_1 \approx 1, \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\mu}_z \approx \omega_0 \times \boldsymbol{\mu}_0 + \omega_1 \times \boldsymbol{\mu}_1. \quad (14)$$

由此可得类间离散方差表达式 S_b 为

$$S_b = \frac{\omega_0 [(\omega_0(s,t)\mu_{z,i}\mu_{0,i}(s,t))^2 + (\omega_0(s,t)\mu_{z,j}\mu_{0,j}(s,t))^2]}{\omega_0(s,t)(1 - \omega_0(s,t))}. \quad (15)$$

当类间离散方差达最大值 $\max\{S_b\}$ 时,对应的 (s_0, t_0) 为图像分割最佳阈值数据.

2.2 二维 Otsu 斜分快速算法

传统的二维 Otsu 应用存在两个缺陷:一是概率为零的假设仅在远离对角线的部分成立,计算最佳阈值时,如果将靠近对角线的概率非零数据被忽略,势必会影响分割结果;二是在运算过程中,需建立阈值点数据 s 和 t 的双重循环,在循环内部需要对 $s \times t + (L-s) \times (L-t)$ 个数据点作累加运算,总计算量大、耗时长,不适用于连续图像的实时处理.改进后的二维 Otsu 斜分快速算法图像分割方式,如图 3 所示.建立截距为 N 的沿对角线方向的斜方窄带区域(图 3 阴影部分),斜线表达式为

$$f_{\perp} = g + N, \quad f_{\top} = g - N. \quad (16)$$

划定通过二维 Otsu 阈值斜分法图上设定的阈值点 (s, t) ,且与对角线相垂直的斜分线,进行图像区域分割,则位于窄带区域内斜分线两侧的像素点对应于图像主体目标像素比例 ω_0 和图像背景像素比例 ω_1 ,可以推断出该斜分线表达式为

$$f = s + t - g. \quad (17)$$

改进后的二维 Otsu 斜分分割具有以下 3 点优势:1) 当 N 取足够大时,可以将所有概率不为零的点都包括进来,避免了误分割;2) 运算时仅包括窄带内的数据,而将其余部分忽略,缩小了运算范围;3) 如果将 $s+t$ 看成一个整体,则该斜分准则可以避开从 s, t 两维角度来进行阈值计算判断,而只与其两者之和的一个数据来进行阈值计算判断,将运算从二维降低转换为一维,大幅降低了运算量.

3 二维 Otsu 自适应阈值斜分快速算法的改进

在实际工程图像处理时面临着各种工况,图像自身的复杂度、图像获取时环境的光照度等,使应用二维 Otsu 自适应阈值快速算法处理时,对每幅待处理图像 f 轴和 g 轴均有不同的最佳斜线轴截距 N, M .针对这些问题,提出动态窄带斜线轴截距 N, M 的自适应选择方法.

3.1 二维 Otsu 直方图斜分窄带判决域分析

斜方窄带判决域分析,如图 4 所示.在包含所有图像灰度信息前提下,图像不同或图像处理条件不同,斜线轴截距 N, M 存在动态变化,大部分情况下截距 N 不等于截距 M ,如包含了所有像素灰度信息的组合 M_1, N_1 .在图像分割前人为指定了 N, M ,如 $M_2 = N_2 = 40$ 的组合,必然会导致以下某种情况出现:1) 建立的窄带可能会缺漏一部分有效灰度信息数据,导致部分重要的图像信息被忽略,带来图像分割效果不理想;2) 可能会盲目匡大了窄带范围,必然导致运算过程中,相当数据是无效运算,增加了图像分割处理时间,于实时处理不利;3) 指定截距 N 和 M 适应了特定某一幅图像分割,但不适应情况变化后的其他图像分割处理,没有普适性.

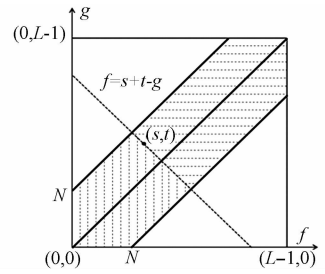


图 3 二维 Otsu 阈值斜分法图

Fig. 3 2D Otsu histogram oblique segmentation method

在建立二维 Otsu 直方图的过程中,直方图上联立灰度的概率密度存在疏密不匀的情况,斜线轴截距 N_2, M_2 建立的窄带内包含了绝大部分的图像灰度信息,只有少部分概率较低的灰度数据落在窄带以外,并且离对角线垂直距离较远.这时要将其匡定在窄带里面,势必要加大斜线轴截距 N, M ,如 N_2/M_1 或者 N_1/M_2 所框定的窄带组合,在没有明显图像分割效果提高的情况下,加入大截距小概率的像素信息后会大幅度增加阈值确定的运算量.因此,相对而言,此种情况下较优的斜线轴截距选择组合仍然是 N_2/M_2 .

3.2 动态斜线轴截距 N 和 M 的自适应确定算法

1) 确立窄带斜方轴截距 N_{\max} 和 M_{\max} . 建立数据链 $(i, j, f_{i,j}, P_{i,j}, N_{i,j}/M_{i,j})$. 其中, $N_{i,j}$ 为 $i < j$ 的情况下阈值点坐标为 (s, t) 时对应的 g 轴斜线轴截距数据(即 $s = i, t = j$ 时); $M_{i,j}$ 为 $i > j$ 情况下的 f 轴斜线轴截距数据. 由图 3 可知: 对角线上方的窄带斜线表达式为 $f = g - N$; 对角线下方的窄带斜线表达式为 $f = g + M$. 因此, $N = g - f$, 代入相关数据信息可得 $N_{i,j} = j - i$, 同理可得 $M_{i,j} = i - j$. 在原二维 Otsu 斜分快速算法计算 $f_{i,j}, P_{i,j}$ 过程中, 可以直接计算得到 $N_{i,j}, M_{i,j}$. 令动态斜方最优轴截距 N, M 为 N_{\max}, M_{\max} , 设其初始值为零, 在计算 $N_{i,j}, M_{i,j}$ 的同时, 通过不断地比较, 持续更新 N_{\max}, M_{\max} 数据, 则在图像遍历计算获得 $f_{i,j}, P_{i,j}$ 的同时, 可获得在二维直方图中包含所有灰度数据信息的窄带斜方轴截距 N_{\max}, M_{\max} .

2) 对应轴截距 N, M 的图像像素概率密度信息数据分析. 建立两个图像像素概率密度的一维数组 $P_N[], P_M[]$, 在计算 $N_{i,j}, M_{i,j}$ 的同时, 可以获得 $P_N[], P_M[]$ 数据, 计算公式为

$$P_N[N_{i,j}] += P_{i,j}, \quad P_M[M_{i,j}] += P_{i,j}, \tag{18}$$

$$\sum P_N[] + \sum P_M[] = 1. \tag{19}$$

假设图像中出现窄带斜方轴截距 $N_{i,j} = 15$ 的情况共有 3 处, 分别是 $N_{i=5, j=20}, N_{i=20, j=35}, N_{i=33, j=48}$, 则一维数据元素 $P_N[15]$ 的数据为三处的 $P_{i,j}$ 累加值, $P_M[]$ 计算过程类似相同. 因此, 在图像遍历计算获得 $f_{i,j}$ 和 $P_{i,j}$ 的同时, 也获得了对应于 N, M 的图像像素概率密度信息数据. 图 1(a) 图像及对应于各 N, M 的图像像素概率密度信息数据图, 如图 5 所示.

由图 5 可知: 截距 N_{\max} 为 79; 截距 M_{\max} 为 103; 图像像素概率较集中的区域为两轴截距 20 以内. 对图像(图 1(a))进行不同轴截距组合情况的图像分割处理, 涵盖了较集中信息时, $N = 20, M = 20$ 的图像分割结果, 如图 6(a) 所示. 当窄带取 $N = 60, M = 80$ 时, 涵盖了图像主要信息, 图像分割结果如图 6(b) 所示. 当窄带取 $N = 80, M = 100$ 时, 涵盖了图像所有信息, 图像分割结果如图 6(c) 所示. 由图像分割结果比较可知: 图 6(b), (c) 基本没有区别, 分割效果较图 6(a) 更好, 保留的图像主体目标像素更完整. 因此, 在不影响图像分割质量的前提下, 考虑工程需求偏向实时性要求的情况, 可以根据图像像素概率密度一维数组 $P_N[]$ 和 $P_M[]$ 内数据, 在图像分割时自适应地忽略大截距小概率的像素信息, 使自适应阈值在计算过程中, 能更快速定位, 以满足实时性的需求.

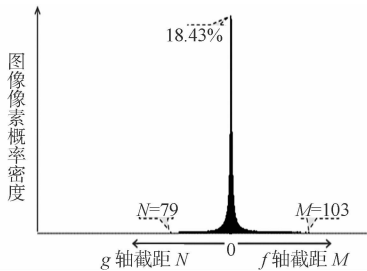


图 5 图像像素概率密度信息数据图

Fig. 5 Image pixel probability density data map

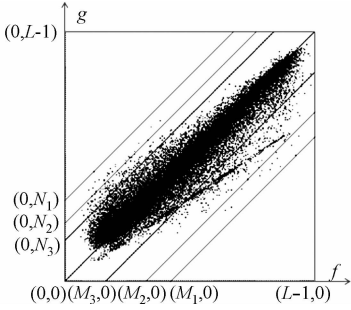


图 4 斜方窄带判决域分析

Fig. 4 Analysis of the trapezium narrowband decision domain



(a) $N = M = 20$ (b) $N = 60, M = 80$ (c) $N = 80, M = 100$

图 6 图像分割效果图

Fig. 6 Image segmentation effect diagram

4 结束语

分析原二维 Otsu 自适应阈值快速算法人为匡定轴截距形成斜方窄带判决域的缺陷, 在没有增加原算法复杂度的前提下, 提出动态窄带斜方轴截距 N 和 M 的自适应选择方法. 该方法能根据图像自身特征自动地建立斜方窄带判决域, 克服原快速算法存在的缺陷. 在分析图像像素概率密度信息基础上, 考虑图像处理时实时性要求, 设立了自动忽略大截距小概率的像素信息准则, 对建立的斜方窄带判决域进一步优化调整. 改进后的二维 Otsu 自适应阈值快速算法可以适应图像分割的实际工况, 在实验验证中取得了良好的图像分割效果.

参考文献:

[1] 章毓晋. 图像分割评价技术分类和比较[J]. 中国图形图像学报, 1996, 1(2): 151-157.

[2] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on System Man and Cybernetic, 1979, 9(1): 62-66.

[3] 刘建庄, 栗文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割方法[J]. 自动化学报, 1993, 19(1): 101-105.

[4] 郝颖明, 朱枫. 二维 Otsu 自适应阈值的快速算法[J]. 中国图像图形学报, 2005, 10(4): 484-488.

[5] 杨金龙, 张光南, 厉树忠, 等. 基于二维直方图的图像分割算法研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(4): 400-403.

[6] 吴一全, 潘喆, 吴文怡, 等. 二维直方图区域斜分的最大熵阈值分割算法[J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(1): 162-168.

[7] 范九伦, 雷博. 灰度图像最小误差阈值分割法的二维推广[J]. 自动化学报, 2009, 35(4): 386-393.

[8] 陈琪, 熊博莅, 陆军, 等. 改进的二维 Otsu 图像分割方法及其快速实现[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1100-1104.

[9] 朱齐丹, 荆丽秋, 毕荣生, 等. 最小误差阈值分割法的改进算法[J]. 光电工程, 2010, 37(7): 107-113.

[10] 梁义涛, 庞蕊, 朱远坤. 灰度图像二维 Otsu 折线阈值分割法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(33): 178-182.

[11] 张新明, 李振云, 孙印杰, 等. 快速二维直方图斜分最小误差的图像阈值分割[J]. 电光与控制, 2012, 19(6): 8-12.

[12] 李森, 杨恢先. 改进二维直方图区域划分的阈值分割方法研究[J]. 光电子·激光, 2013, 4(7): 1426-1433.

[13] 何志勇, 孙立宁, 陈立国. Otsu 准则下分割阈值的快速计算[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 267-272.

Improvement for 2D Otsu
Adaptive Threshold Fast Algorithm

QIAN Wei-xing^{1,2}, HUANG Li-ya²

(1. Electronic Information College, Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Base on the characteristics of the trapezium narrowband verdict scope of 2D Otsu adaptive threshold fast algorithm. Through the establishment of distribution data of the information association between narrowband trapezium intercept and image pixel two-dimensional probability density, this paper proposes a dynamic trapezium intercept narrowband adaptive selection method without increasing complexity. The experimental result has demonstrated that the improved fast algorithm of two-dimensional Otsu adaptive threshold was more adapted to the actual condition of image segmentation, and has achieved good effect.

Keywords: image segmentation; 2D Otsu; trapezium narrowband; adaptive intercept

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)